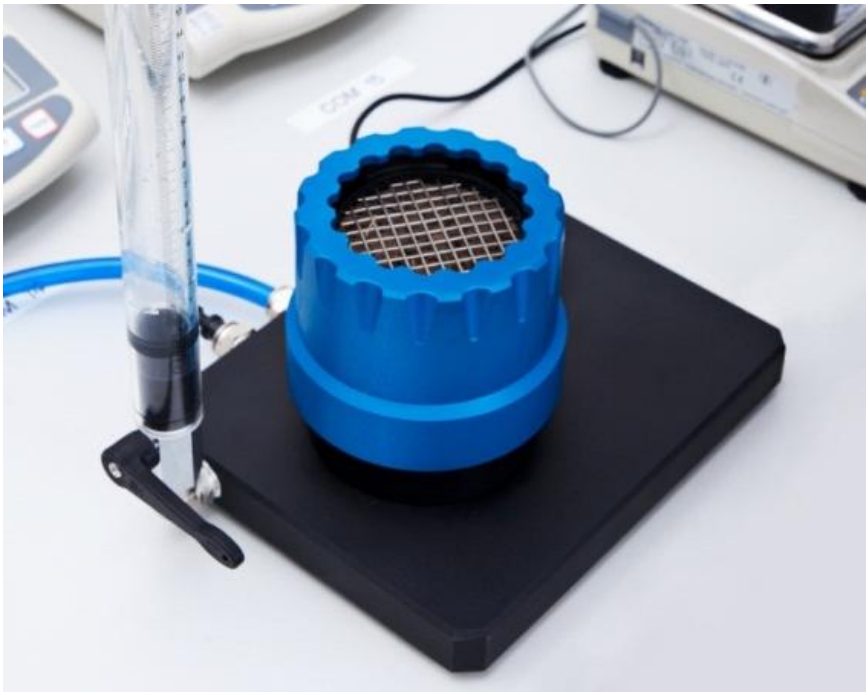
Bedienungsanleitung



KSAT

© UMS GmbH München
Art.Nr. KSAT
Version 10/2012
Author: wd/tk/tp

Vorwort zur Verwendung des KSAT im Rahmen des Praktikums "Bodenkundliche Labormethoden" 2012

Für Bestimmungen der gesättigten Wasserleitfähigkeit gibt es eine Vielzahl von Geräten, die mehr oder weniger voneinander abweichen, weil fast jeder Versuchsansteller sich sein Gerät selbst zusammenbauen muss (Hartge und Horn, 2009).

Die Firma UMS GmbH München hat sich in Zusammenarbeit mit dem Institut für Geoökologie der TU Braunschweig vorgenommen, ein einfach zu benutzendes und komfortables Messsystem namens KSAT für Messungen mit konstantem und fallendem Überstau zu entwickeln, das derzeit zur Serienreife gebracht wird. Sie als Studierende der Geoökologie an der TU Braunschweig sind die ersten Nutzer, die dieses Gerät standardmäßig einsetzen.

Die vorliegende Bedienungsanleitung ist ein Entwurf. Die Studierenden werden gebeten, die Anleitung in Hinblick auf die Lesbarkeit, Verständlichkeit, Richtigkeit, sowie in Hinblick auf Tippfehler und stilistische Fehler kritisch zu prüfen und eine konstruktive Rückmeldung an mich zu geben!

Braunschweig, 6.11.2012

Wolfgang Durner

Inhalt

1 KSAT 6

1.1 Sicherheits- und Gefahrenhinweise 6

1.2 Lieferumfang 7

1.3 Vorwort 10

1.4 Danksagung 10

1.5 Bestimmungsgemäße Verwendung 11

1.6 Garantie 12

2 Produktbeschreibung 13

2.1 Systemkomponenten 13

2.2 Hardware: Aufbau des KSAT-Systems 13

2.3 Software KSAT VIEW® 18

2.4 Minimale und maximal messbare KSAT-Werte 22

2.5 Messdauer 22

3 Mess-Vorbereitung 23

3.1 Probenahme und Probenaufsättigung 23

3.2 Montage der Probe 29

4 Durchführung einer Messkampagne 34

4.1 Startbedingungen für Hardware 34

4.2 Konfiguration der Kampagne in KSAT View 34

4.3 Durchführung der Messung 36

4.4 Ausbauen der Stechzylinderprobe 39

4.5 Auswertung der Messdaten 40

4.6 Exportieren von Messdaten und Ergebnissen 40

4.7 Typische Ergebnisse 41

5 Wartung und Pflege 43

Entwurf

6 Fehlersuche 45

7 Theoretische Grundlagen 48

7.1 Allgemeines 48

7.2 Messprinzip 48

7.3 Constant Head-Messung 48

7.4 Falling Head-Messung 50

7.5 Berücksichtigung des Apparaturwiderstandes 54

7.6 Einfluss der Temperatur auf Ks 55

8 Literaturverzeichnis 57

9 Abbildungsverzeichnis 58

1 KSAT

Labormessverfahren zur Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit von Bodenproben nach DIN 19683-9 und DIN 18130-1.

Highlights des KSAT-Systems sind:

- Vollautomatisierte Messung, Auswertung und Speicherung der Daten (bei der Falling-head-Methode)
- Einfachste Bedienung
- Komfortable Benutzeroberfläche
- Schnelles und robustes Mess- und Auswerteverfahren
- Durch höchste Präzision uneingeschränkt geeignet für stark durchlässige bis sehr schwach durchlässige Materialien
- Falling-head- und Constant-head-Methode verwendbar
- Geeignet auch für Stand-alone Langzeitmessungen
- Voll kompatibel mit dem HYPROP©-Messsystem zur ergänzenden Messung der ungesättigten Leitfähigkeitsfunktion und der Retentionseigenschaften

Entwurf

1.1 Sicherheits- und Gefahrenhinweise

Beim Umgang mit Produkten, die mit elektrischer Spannung in Berührung kommen, müssen die gültigen VDE-Vorschriften beachtet werden, insbesondere VDE 0100, VDE 0550/0551, VDE 0700, VDE 0711 und VDE 0860. Bitte beachten Sie, dass Bedien- und Anschlussfehler außerhalb unseres Einflussbereiches liegen. Verständlicherweise können wir für Schäden die daraus entstehen keine Haftung übernehmen.

Der elektronische Druckaufnehmer ist ein Messgerät zur Messung des Differenzdrucks zweier Wassersäulen und der Bodentemperatur und nur für diesen Zweck einzusetzen. An dieser Stelle möchten wir besonders auf folgende Gefahren-Quelle hinweisen:

- Überdruck: Die zerstörungsfreie maximale Drucklast der Druckaufnehmer beträgt 100 hPa. Sofern der Eingang des Drucksensors mit einem höheren dynamischen oder statischen Druck beaufschlagt wird, besteht die Gefahr der Zerstörung des Sensors.
- Berührung: Die Messfläche des Druckaufnehmers liegt zugunsten höchster Messpräzision frei im Körper des Messgerätes. Die Messfläche darf bei Reinigung oder anderen Tätigkeitne niemals mit einem spitzen Gegenstand oder einem scharfen Wasserstrahl in Berührung kommen, sonst besteht die Gefahr der Zerstörung des Sensors.

1.2 Lieferumfang

Im Lieferumfang sind enthalten (Basis):

- Die Grundplatte mit angeschlossener Bürette, über Hahn verschließbarer Zuleitung für Wasser, Bürettendeckel mit Stahlkapillare, Ableitung für Wasser, elektronischer Druckmessung und integriertem USB-Anschlusskabel.
- Eine Porenplatte zum Anschluss eines Stechzylinders mit dem Messgut an die Grundplatte (Dom).
- Die Siebkrone zur oberseitigen Fixierung des Stechzylinders bei konsolidiertem Messgut.
- Die Filterkrone zur oberseitigen Fixierung des Stechzylinders bei unkonsolidiertem Messgut.
- Eine Schraubkappe zur Fixierung des Stechzylinders auf dem Messgerät.
- Edelstahlplatte zum Einsatz bei einem Prüfversuch für die Steigung des Druckaufnehmers
- 5-Liter Vorratsgefäß mit Gradierung und Sperrhahn am Auslaufstutzen
- 1,2 m Zuleitungsschlauch zur Verbindung von Vorratsgefäß und Bürette
- 1,2 m Ableitungsschlauch zur Ableitung des perkolierenden Wassers

- 2 Ersatzdichtungsringe für Siebkrone bzw. Filterkrone, 84mm x 2mm ∅
- KSAT View Software auf USB Stick
- Eine Wanne für Stechzylinderaufsättigung und Unter-Wasser-Montage des Messguts
- 1 Stechzylinder 250 ml

Zusätzlich erhältlich sind bei UMS im Set (Rundum-Sorglos-Paket):

- 1 Stechzylinder 250 ml mit Probenahmeset (Hammer, Schlaghaube, Präparierwerkzeug, Deckel, Transportschutz,)
- Wischlappen zur Aufnahme von Spritz- und Tropfwasser
- Pinsel/Bürste zur Reinigung von Bürette und System
- Verdunstungsschutz für Langzeitmessungen

Entwurf

Abb. 1: Schematische Darstellung der UMS-KSAT-Apparatur.

1.3 Vorwort

Messsysteme müssen zuverlässig, wartungsarm und langlebig sein, um präzise Ergebnisse zu liefern und um den Betreuungsaufwand minimal zu halten. Der Erfolg jeder technischen Einrichtung ist aber auch von der sachgerechten Anwendung abhängig.

Zu Beginn einer Messaufgabe oder eines Forschungsprojektes müssen aus der Zieldefinition alle Einflussgrößen gesamtheitlich betrachtet sowie Gegebenheiten und Randbedingungen definiert werden. Daraus leiten sich die Anforderungen an das wissenschaftliche und technische Projektmanagement ab, das alle qualitätsrelevanten Prozesse definiert, die Auswahl der einzusetzenden Verfahren trifft, die der technischen und messtechnischen Werkzeuge, der Verifizierung, der Datenablage und der Modellierung. Das kontinuierlich optimierte Zusammenwirken der einzelnen Teilbereiche und deren Qualitätssicherung sind schließlich ausschlaggebend für den Erfolg des Projektes.

Wir wünschen Ihnen viel Erfolg bei Ihren Messprojekten und stehen Ihnen gerne weiter zur Verfügung.

Ihr

Georg von Unold

Entwurf

1.4 Danksagung

An dieser Stelle möchten wir Herrn Professor Dr. Wolfgang Durner, TU Braunschweig, sehr herzlich für die Unterstützung bei der Entwicklung, den zahlreichen Fachgesprächen mit theoretischem Hintergrund sowie praktischen Tipps unseren Dank aussprechen. So wurde aus der tausendfach bewährten Methode ein anwenderfreundliches System mit dem Fokus auf Zuverlässigkeit, höchste Präzision und Aussagekraft, das sich dabei vergleichsweise einfach bedienen läßt. Einfaches Handling, schnelles Messen und höchste Präzision sind neben der graphischen interaktiven Menüführung und den Echtzeitdarstellung der Mess- und Fittingroutinen die technisch-wissenschaftlichen Highlights, die Ihr Ksat-System zu einem modernen Bodenlaborsystem machen.

1.5 Bestimmungsgemäße Verwendung

Das KSAT© dient der Messung und Bestimmung der gesättigten Wasserleitfähigkeit an 250 cm^3-Stechzylindern nach dem Prinzip des Falling-head- oder Constant-head-Experiments. Die Methodik folgt in der Auslegung den Vorgaben der DIN 19683-9 und DIN 18130-1 und beruht auf der Invertierung des Darcy-Gesetzes.

Das Darcy-Gesetz (auch Darcy-Gleichung genannt) besagt, dass die Wassermenge Q, die eine Fläche A in einem porösen Medium durchströmt, direkt proportional zum hydraulischen Gradienten ist (Darcy, 1856). Der Proportionalitätsfaktor dieser Beziehung, der kf-Wert oder Durchlässigkeitsbeiwert, in diesem Dokument als „gesättigte hydraulische Leitfähigkeit“ mit dem Symbol Ks und der Abkürzung KSAT gekennzeichnet, ist ein Kennwert für das poröse Medium und das durchströmende Fluid.

Die Auswertungsgleichungen basieren auf der Annahme laminaren Wasserflusses. Sie gelten mithin nur für geringe Fließgeschwindigkeiten, die über den hydraulischen Gradienten gesteuert werden können. Um dem an der Entnahmestelle im Gelände herrschenden Zustand am nächsten zu kommen, sollte mit kurzen Perkolationszeiten, geringen Gradienten sowie stoß- und erschütterungsfrei gearbeitet werden (DIN 19683-9, 1998; Hartge und Horn, 2009).

Änderung des Quellungszustandes der Stechzylinderprobe, des Ionenbelages der Austauscher, Luftabscheidung aus dem Perkolationswasser und Bakterienwuchs können die Messungen stark beeinflussen. Gesättigte Leitfähigkeitswerte von Bodenproben können typischerweise über mehrere Größenordnungen streuen. Zur Charakterisierung der Bodeneigenschaften eines Standorts ist somit die Vermessung mehrerer Proben unabdingbar.

Das KSAT©-System ist in den Maßen der Stechzylinder mit dem HYPROP©-System kompatibel. Das HYPROP©-System dient ergänzend zur Bestimmung der Retentionsfunktion und der ungesättigten hydraulischen Leitfähigkeit als Funktion der Wasserspannung oder des Wassergehaltes von Bodenproben. Es wird empfohlen, die KSAT-Messung als Anfangsmessung vor einer nachfolgenden HYPROP©-Messung am selben Stechzylinder durchzuführen.

1.6 Garantie

Die Garantiedauer beträgt 12 Monate und erstreckt sich bei bestimmungsgemäßer Verwendung auf Herstellungsfehler und Mängel. Der Umfang ist beschränkt auf die ersatzweise Lieferung oder Reparatur inkl. Verpackung. Versandspesen werden nach Aufwand berechnet. Erfüllungsort ist München, Gmunderstr. 37.

Entwurf

2 Produktbeschreibung

2.1 Systemkomponenten

Das KSAT©-Messsystem besteht aus einem Messgerät mit integrierten Systemkomponenten zur Wasserdruckaufnahme, einer Bürette für den Zufluss von Wasser, einen Porenplatte zur Verbindung zwischen Messgerät und Messgut, eine Sieb- bzw. Filterkrone mit Dichtungsring zum oberseitigen Abschluss des Stechzylinders mit dem Messgut, und einer Schraubkappe zur Fixierung des Stechzylinders. Ein Druckaufnehmer im Messgerät kommuniziert über einen USB Anschluss mit der PC-Software KSAT VIEW. Die Signale des Differenzdruckaufnehmers werden die PC-USB-Schnittstelle ausgegeben, mit der KSAT VIEW-Software aufgenommen, in Real-Zeit visualisiert und ausgewertet.

2.2 Hardware: Aufbau des KSAT-Systems

2.2.1 Messgerät-Basis

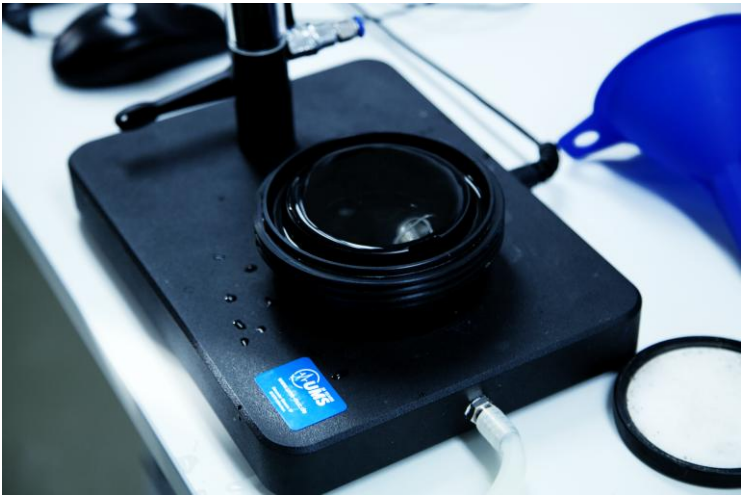


Abb. 2: Grundplatte

Die Basis des Messgerätes bildet einen Sockel, welcher das Zu- und Abfluss-System für die Bodenprobe und die Sensorik für die Druckmessung enthält. Fest verbunden damit ist eine gradierte Bürette. Nach Montage der Probe im System erfolgt die Durchflussmessung, in dem nach Öffnen des Verbindungshahns zwischen Bürette und Messgut eine durch Gravitation angetriebene Durchströmung des Messgutes von unten nach oben erfolgt.

2.2.2 **Bürette**

Die Bürette bestehen aus bruchfestem Acrylglas (Resist 65, blau, transluzent), ist 21 cm lang, hat einen Innenquerschnitt von 4.57 cm². Sie ist an der Basis auf einen Kugelhahn aufgesetzt, welcher an den Korpus des KSAT-Gerätes angeflanscht ist. Die Zufuhr von Wasser ins System erfolgt nach Öffnen des Verbindungshahns. Bei geöffnetem Verbindungshahn wird der Wasserstandsunterschied zwischen Bürette (Zulaufseite) und dem freien Wassespiegel im oberen Adapterring (Ablaufseite) millimetergenau gemessen und aufgezeichnet. Die Befüllung der Bürette erfolgt mit entlüftetem Wasser aus einem höher gelagerten Vorratsgefäß, welches über einen Schlauch und einen Verbindungshahn angeschlossen ist.

In die Öffnung der Bürettenabdeckung kann am oberen Abschluss eine Kapillare eingesetzt werden. Je nach Stellung der Kapillare kann die Bürette für den Falling-head-Messungen als offene Bürette (Kapillare nach oben verschoben, ohne Eintauchen in das Wasser), oder für Constant-head-Messungen als Mariotte'sche Bürette (mit eingetauchter Kapillare) verwendet werden.

2.2.3 **Drucksensor**

In den Gerätesockel integriert ist ein hochpräziser Druckaufnehmer, welcher den Druck des zufließenden Wassers aufnimmt, und eine integrierte Elektronik, welche das Temperatur- und Drucksignal über einen USB-Anschluss an einen PC liefert. Die Druckhöhendifferenz zwischen Wasserzulauf und Ablauf wird in einer Auflösung < 1 mm und ein einer zeitlichen Auflö-sung im Sekundenbereich übermittelt.

2.2.4 Temperatursensor

Ebenfalls in die Systembasis integriert ist ein Temperatursensor, dessen Signale über den USB-Anschluss an den angeschlossenen PC übermittelt werden. Die Kenntnis der Temperatur während der Messung erlaubt eine Umrechnung des Ergebnisses auf andere Temperaturen aufgrund der Viskositätsänderung von Wasser.

2.2.5 Stechzylinder

Das Messgut muss sich in einem mit dem HYPROP-System kompatiblen Edelstahl-Stechzylinder mit einem Volumen von 250 ml (Höhe 5,0 cm, Außendurchmesser 84 mm, Innendurchmesser 80 mm) befinden. Es dürfen keinerlei Randspalte bestehen.

2.2.6 Porenplatte zur Verbindung zwischen Messgerät und Messgut

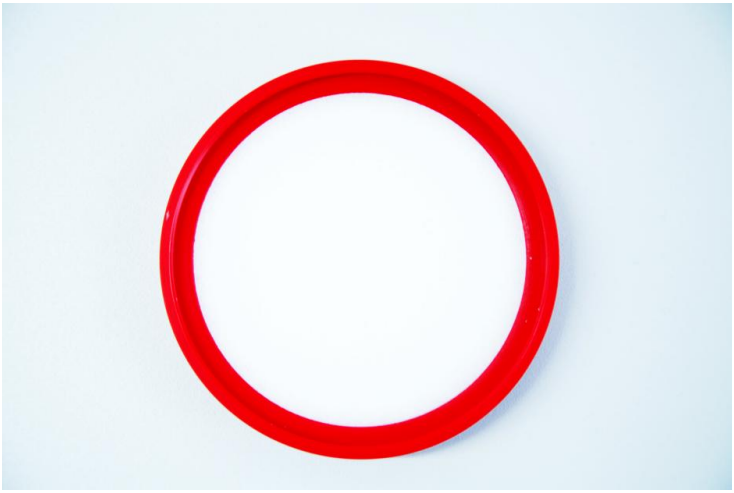


Abb. 3: Porenscheibe mit Porenplatte.

Die Porenplatte mit eingelagerter hochdurchlässiger poröser Platte dient zur Verbindung zwischen Grundplatte und Stechzylinder. Die Dichtung

zwischen Adapterring und Basis erfolgt durch Pressung der Stechzylinder-Stirnfläche auf den Adapterring, die dicchtung zwischen Adapterring und Stechzylinder durch seitliche Dichtungslamellen. Der Adapterring wird unter Wasser auf die der Schneide entgegengesetzte Seite des Stechzylinders aufgesetzt, das so verbundene System wird im Wasser gedreht, dem Wasserbad entnommen, und das KSAT-Gerät aufgesetzt

2.2.7 **Sieb- bzw. Filterkrone**

Abb. 4: Obere Siebkrone mit Gitter

Die obere Krone dient zur zentrischen Fixierung des Messgutes sowie als definierte Überlaufkante. Sie wird auf der Schneide des Stechzylinders gleichmäßig aufgepresst. Das Gitter in der Krone verhindert nach Öffnen des Wasserzulaufs ein Herauspressen der Probe durch den anliegenden Wasserdruck. Bei der Vermessung von feinkörnigen unkonsolidierten Proben kann es notwendig sein, zur Vermeidung von Erosion des Messgutes die Krone mit einer feinmaschigen Siebscheibe zu unterlegen. Nach Fixierung mit der Schraubkappe sind die Systemkomponenten dicht verbunden und das durch den Stechzylinder perkolierende Wasser kann in definierter Überstauhöhe über den Rand des oberen Adapters abfließen.

2.2.8 **USB-Anschluss**

Der Systemausgang mündet über ein 2,0 m langes Kabel in einen USB-Stecker, der mit einem PC oder Notebook verbunden wird. Das KSAT-System setzt auf den tensioLINK®-Messbus auf. Um mit dem PC auf diese Geräte zuzugreifen, steht die Windows Software KSAT VIEW zur Verfügung. Die Software erkennt automatisch nach dem Start das am Bus angeschlossene Gerät und ermöglicht dessen Konfiguration und die Darstellung der Daten.

Schmutz in der USB-Steckverbindung kann die mechanische und elektronische Funktion der Steckverbindung beeinträchtigen.

2.3 Software KSAT VIEW®

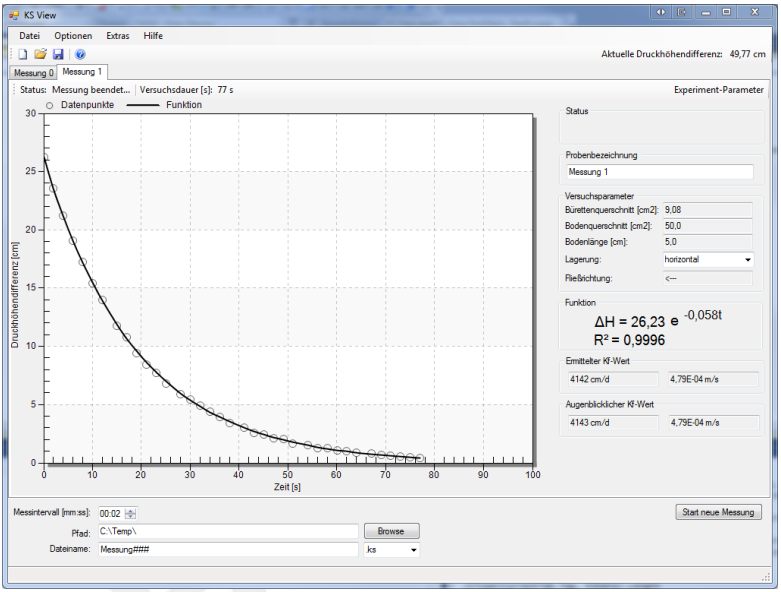


Abb. 5: KSAT View-Benutzeroberfläche

KSAT View® ist eine Benutzeroberfläche, die das Auslesen und Konfigurieren des KSAT-Gerätes intuitiv ermöglicht (Abb. 5).

Nach dem Start der KSAT Software verbindet sich ein an den USB Port angeschlossenes KSAT automatisch mit der KSAT Software.

Konfiguration des Gerätes

In dem Register „Konfiguration“ können Einstellungen im Gerät abgelesen und geändert werden. Normalerweise sind keine Änderung an der Konfiguration für den Messbetrieb erforderlich. Bitte ändern Sie nur Einstellungen, deren Auswirkungen Sie kennen. Geräteeinstellungen können in zwei Benutzerklassen geändert werden.

Der *Standard-Benutzer* kann die für individuelle Messkampagnen variablen Größen einstellen (Verzeichnisname zur Datenspeicherung, Name der Kampagne, Counter zur Namenserweiterung, Messmodus):

Verzeichnis (character*12)

frei anwählbares Verzeichnis im Filesystem.

Name (character*12)

frei definierbarer Name der Messkampagne in ASCII. Maximale Länge: 12 Zeichen.

Automatisches Messintervall (ja/nein))

Indexvariable, welche die Wahl zur automatischen oder manuellen Vorgabe der Datenaufzeichnungs-Zeitpunkte bestimmt (Defaultwert: true)

Messmodus (Constant-head, Falling-head, Rekalibrierung)

Indexvariable, welche die Wahl zur automatischen oder manuellen Vorgabe der Datenaufzeichnungs-Zeitpunkte bestimmt (Defaultwert: true)

Der *Poweruser* kann alle weiteren in die Auswertung eingehenden Parameter manipulieren. Die Konfigurationsparameter des KSAT-Systems sind im Folgenden gelistet.

Bodensäule Höhe (in cm)

Höhe der Bodensäule in cm (Defaultwert: 5.0 cm).

Bodensäule Fläche (in cm²)

Querschnittsfläche der Bodensäule in cm² (Defaultwert: 50.0 cm²).

Bürette Fläche (in cm²)

Querschnittsfläche der Bodensäule in cm² (Defaultwert: 4,56 cm²)

Gerätewiderstand 1/K_{sys} (K_{Sys} in cm/d)

Die eingebauten porösen Platten und die Strömungswiderstände der Leitungen tragen zum Fließwiderstand bei. Dies wird bei der Auswertung herausgerechnet (siehe Theorie). (Defaultwert: K_{Sys} = 50000 cm/d)

Messintervall (in s)

Intervall für die Zeitpunkte der Datenaufzeichnung (Defaultwert: 5 s)

H_stop_abs (in cm)

Messwert für Druckhöhendifferenz, bei dessen Unterschreitung die Messung beendet wird. (Defaultwert: 2.0 cm)

H_stop_rel (ohne Einheit)

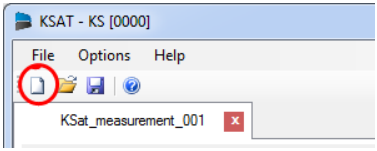
Bruchteil der initialen Druckhöhendifferenz, bei dessen Unterschreitung die Messung beendet wird. (Defaultwert: 0.25)

T_ref (in °C)

Referenztemperatur., für die das korrigierte Ergebnis berechnet werden soll (Defaultwert: 20°C).

2.3.1 Aktuelle Messwerte

Nach Aufruf der Software werden im Fenster rechts oben die aktuelle Relativdruck[1] und die aktuelle Temperatur angezeigt. Mit Anklicken der Taste Eingabe des <Neu> werden die Messwerte sowie Auswertungsergebnisse im Hauptfenster gezeigt.

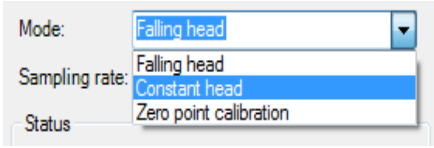


[1] Der Relativdruck stellt die Druckdifferenz gegenüber dem Wasserspiegel am Überlauf dar.

2.3.2 Messmodus Nullpunktkalibrierung

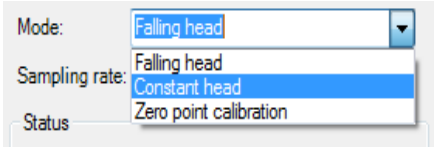
Im Messmodus Nullpunktkalibrierung wird der Offset des Druckaufrnehmers so eingestellt, dass ein antreibender Druckgradient von Null als exakt 0,00 cm angezeigt wird. Diese Rekalibrierung ist dann zu empfehlen, wenn das Gerät transportiert wurde, sein Standort verändert wurde, es Erschütterungen ausgesetzt wurde, die Temperatur beim Messvorgang gegenüber der letzten Rekalibrierung deutlich verändert wurde, das Gerät länger nicht benutzt wurde, oder wenn anderweitig zu befürchten ist, dass der Druckaufnehmer speziellen Belastungen ausgesetzt war. Nähere Hinweise zur Rekalibrierung finden sich in Kapitel 3.xx.

2.3.3 Messmodus Falling head



Der Messmodus „Falling Head “ ist der Standardmodus für Messungen. Er wird aktiviert zur Durchführung von Falling Head Messungen. Nach Starten einer Messkampagne werden die auflaufenden Daten automatisch dargestellt und ausgewertet. Es ist keinerlei manueller Eingriff nötig.

2.3.4 Messmodus Constant head



Der Messmodus „Constant Head “ ist ein Alternativmodus für Constant Head Messungen. Nach Starten einer Messkampagne müssen durch Mausklicks die Zeitpunkte ans System gemeldet werden, an denen in der Bürette vorgegebene Wasserständer erreicht werden. Die auflaufenden Daten werden automatisch dargestellt und ausgewertet.

2.4 Minimale und maximal messbare KSAT-Werte

Die minimal messbare Leitfähigkeit ist 0.01 cm/d, die maximale 5000 cm/d. Die statistische Ungenauigkeit der ermittelten Werte beträgt bei Konstanz der Umgebungsparameter und Konstanz des Fließwiderstandes im Boden etwa 2 %. In der Praxis ist mit einer Ungenauigkeit von 10 % zu rechnen. Die ermittelten Werte sollten somit i.d.R. mit 2 signifikanten Ziffern angegeben werden (Beispiele: 6,5 cm/d, 12 cm/d, 120 cm/d; 3.7E-6 m/s).

In der in KSAT View vorgenommenen Auswertung wird der Fließwiderstand der porösen Platte am Zulauf berücksichtigt. Da die Platten-Leitfähigkeit mit rund 50000 cm d^{-1} sehr hoch ist, ist die Korrektur allerdings nur für extrem leitfähige Messgüter von Belang.

2.5 Messdauer

Typische Messdauern bewegen sich für sehr leitfähige sandige Substrate (~1000 cm d^{-1}) im Bereich von Sekunden bis wenigen Minuten, für unstrukturierte tonige Substrate mit sehr geringen Leitfähigkeiten (< 0.1 cm d^{-1}) im Bereich von 24 Stunden.

Entwurf

3 Mess-Vorbereitung

3.1 Probenahme und Probenaufsättigung

3.1.1 Stechzylinderprobenahme

Nach DIN 19683-9 können Wasserdurchlässigkeitsmessungen an Stechzylinderproben in gestörter oder in ungestörter Lagerung durchgeführt werden. Bei einer in-situ-Probenahme in horizontbezogener, ungestörter Lagerung ist nach DIN 19672-1 und E DIN ISO 10381-4 zu verfahren, wobei die Entnahmerichtung nach dem Anwendungszweck und dem Aussageziel festzulegen ist. Gepackte Proben erlauben keine Aussagen über in situ-Leitfähigkeiten, da diese in der Regel durch die Bodenstruktur bestimmt werden.

Zur Entnahme ungestörter Stechzylinderproben setzen Sie diese in der gewünschten Tiefe auf den freigelegten Boden auf, treiben mit Hilfe einer passenden Schlaghaube und eines mittelgroßen vibrationsfreien Hammers möglichst ohne Verkantung in den Boden (vertikal oder horizontal), und graben diese dann mit einem Spaten wieder so aus, dass der Bodenverbund im Stechzylinder und über die Stechzylinderoberflächen hinaus in der originalen Lagerung bleibt. Anschließend präparieren Sie mit Hilfe eines Messers mit geradem Schaft oder eines Metallsägeblattes auf beiden Stechzylinderseiten absolut plane Oberflächen, ohne dabei Poren zu verschmieren.

Entscheidend bei der Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit ist, dass keine Klüfte, Spalten oder Risse in Richtung der Wasserströmung durch die Probe entstehen. Am problematischsten sind hierbei Randklüfte. Stechzylinder, die verkantet genommen wurden, sind deshalb zu verwerfen. Nach Dirksen (1999) ist nicht die Messgenauigkeit, sondern die Qualität und Repräsentativität der Bodenproben das größte Problem bei der Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit.

In der Regel werden Stechzylinder zum Zweck der Bestimmung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit in wenigstens 5 - 10-facher Wiederholung genommen.

3.1.2 **Perkolationslösung**

Nach DIN (DIN 19693-9, 1998; DIN 18130-1, 1998) soll zur Aufsättigung und als Perkolationslösung entgastes „elektrolytarmes Wasser von Raumtemperatur“ verwendet werden. Als Perkolationsfluid eignet sich entgastes Leitungswasser oder entgastes Wasser mit einer schwachen Lösung eines zweiwertigen Kations (z.B. 0.01 M $CaCl_2$-Lösung; McKenzie et al., 2002). Das Entgasen kann z.B. durch Abkochen erfolgen.

Da die Ionenstärke der Bodenlösung erheblich die Weite der elektrischen Doppelschicht von Böden beeinflusst, und diese sich in feinkörnigen Substraten auf die hydraulische Leitfähigkeit auswirkt, sollte im Ideal ein Perkolationsfluid mit einem Elektrolytgehalt verwendet werden, welcher der in-situ Bodenlösung ähnlich ist. Bei tonhaltigen Böden führt die Verwendung von einwertigen Kationen zur Dispersion der Tonpartikel und zur Ausschwemmung sowie zur Verstopfung des Sekundärporensystems.

Die Perkolationslösung wird aus einem Vorratsgefäß, welches oberhalb der Apparatur gelagert ist, über eine Schlauchleitung und den Hahn der Bürette zugeführt. Dies gewährt neben der komfortablen Befüllung der Bürette minimalen atmosphärischen Kontakt, eine möglichst geringe Rückdiffusion von Luft, sowie die Temperierung auf Umgebungstemperatur.

3.1.3 **Aufsättigung der Probe**

Zur Aufsättigung des Stechzylinders entnehmen Sie vorsichtig den Probendeckel der unteren angefaste Seite (Schneide) des Stechzylinders (Abb. 8/1). Tauchen sie als Trenntextil ein Vlies in Wasser und legen das entsprechend ausgeschnittene Vlies auf die Stechzylinderprobe. Setzen Sie die Aufsättigungsschale auf und drehen Sie alles auf den Kopf, so dass die Schneidkante unten in der Schale liegt und ins Wasser gestellt werden kann (Abb 8/2).

Typischerweise erfolgt zur Erzielung einer hohen Anfangssättigung eine kapillare Aufsättigung, bei der die Luft nach oben verdrängt wird. Hierzu stellen Sie die Stechzylinderprobe mit der Aufsättigungsschale in die mit Wasser (ca. 2 cm unter der Stechzylinder-Schneidkante) gefüllte Aufsättigungswanne. Die Stechzylinderprobe wird somit von unten nach oben aufgesättigt (Abb. 8/3).

Hinweis: Ein Anheben und leichtes Kippen der Probe in der Aufsättigungsschale innerhalb der mit Wasser gefüllten Aufsättigungswanne verhindert, dass sich Luftblasen bzw. Luftpolster zwischen der Probe und dem Vlies bilden können. Bitte führen sie diesen Vorgang vorsichtig durch, ohne dass Bodenpartikel ausgeschwemmt werden.

Je nach Bodentyp, beispielsweise Ton, kann es sehr lange dauern, bis die Probe restlos aufgesättigt ist[2] und die Luft vollständig aus der Probe verdrängt ist. Dies ist erkennbar, wenn die Bodenoberfläche überall glänzt.

Alternativ besteht die Möglichkeit der Aufsättigung der Probe in der KSAT-Apparatur. Hierzu wird die ungesättigte Probe in der Apparatur fixiert und entweder im Falling-head-Modus durch nachlaufendes Wasser aus der Vorratsbürette mit positivem Druck des zulaufenden Wassers aufgesättigt, oder kapillar im Constant-head-Modus, wobei die Kapillare in der Vorratsbürette zunächst vollständig bis auf den Wert „Null“ eingeführt wird. Wegen des notwendigen Austritts von Luft aus der Probe darf hierbei nur der obere Adapter mit dem Gitter zur oberen Fixierung der Probe verwendet werden.

[2] Eine 100%-ige Sättigung des gesamten Porenraums ist mit solcher normaler Aufsättigungstechnik nicht erreichbar, wird für die meisten Messwerke allerdings auch nicht angestrebt. 100%ige Sättiung ist nur durch vorheriges Spülen mit Kohlendioxid oder durch Aufsättigung unter Vakuum erreichbar.

Abb. 6: Aufsättigung der Proben (Reihefolge anhand Beschreibung im Text).

3.1.4 Umgang mit quellenden Proben[3]

Im Zuge der Aufsättigung besteht die Möglichkeit, dass die Probe aufquillt, sofern keine externe Auflast auf sie aufgebracht wird. Für die Vermessung in der KSAT-Apparatur sollte die Probe grundsätzlich das normierte Volumen von 250 cm³, d.h. eine Probenlänge von 5 cm, besitzen. Die DIN-Norm empfiehlt deshalb, die Probe bereits in gequollenem Zustand in situ zu entnehmen. Da aufgrund des Wegfalls der natürlichen Auflast aber auch dann noch eine Nachquellung stattfinden kann, bietet die KSAT-Apparatur die Möglichkeit, durch die aufgesetzte obere Schraubkappe das Quellen zu unterbinden. In dem Fall wird die Probenmasse, die sich im feldfrisch entnommenen Zustand im Zylinder befindet, in eben dem Entnahmevolumen zu belassen, und das Porensystem bleibt gegenüber dem in situ Zustand weitgehend unverändert. Alternativ könnten Sie daran interessiert sein, die Probe im unbelastet aufgequollenen Zustand zu untersuchen. In dem Fall müssen Sie nach Quellung das überschüssige Material bündig zur Stechzylinderoberfläche entfernen, wobei die Probenmasse gegenüber der in situ Masse im Stechzylinder vermindert sein wird.

Hinweis: Es gibt keine allgemein verbindliche Richtlinie, wie Sie bei quellenden Proben zu verfahren haben, und es liegt in der Verantwortung des für die Messung verantwortlichen Wissenschaftlers, die für seinen Zweck dienliche Verfahrensweise zu wählen.

3.1.5 Vollständiger Überstau

Ist die Probe vollständig aufgesättigt, so erhöhen Sie den Einstau durch Absenkung der Probe oder Zufuhr entlüfteten Wassers in die Wanne so lange, bis sich die Probe vollständig unter Wasser befindet (Abb. 8/4). Es wird ein finaler Überstau von ca. 5 cm über dem oberen Ende der Bodenprobe, mithin eine Wasserfüllhöhe in der Wanne von ca. 12 cm empfohlen.

Hinweis: Führen Sie die Überflutung er Probe so langsam und vorsichtig durch, dass die Bodenoberfläche nicht durch erodierte Bodenpartikel verändert wird! Sie können gegebenenfalls die Probe durch Auflegen einer porösen Platte stabilisieren.

3.1.6 **Aufsetzen des Porenscheibe auf den Stechzylinder**

- Lufteinschlüsse zwischen Probe und poröser Platte sowie innerhalb der porösen Platte blockieren den Wasserdurchfluss und sind absolut zu vermeiden. Deshalb erfolgt das Aufsetzen des Adapterrings unter Wasser. Das fehlerfreie Aufsetzen des Adapterrings mit Platte ist der wichtigste und sensibelste Punkt im Handling der KSAT-Apparatur.

- Die im Adapterring eingesetzte Porenplatte muss vor Aufsetzen auf die Probe völlig luftfrei mit Wasser gefüllt sein. Sie erkennen die vollständige Aufsättigung der porösen Platte daran, dass sie in Wasser nicht schwimmt, sondern sich absetzt. Sofern eine vorher ausgetrocknete Platte kurzfristig verwendet werden soll, ist eine Aufsättigung unter Vakuum in einem Exsikkator anzuraten. Es genügt, die unter Wasser befindliche Platte einmal zu evakuieren und dann wieder dem atmosphärischen Druck auszusetzen.

  Die Porenscheibe wird (mit oder ohne eingesetzte Porenplatte) in der Wanne zusammen mit dem überstauten Stechzylinder vollständig unter Wasser gehalten, um die Luftfreiheit aller Teile zu gewährleisten (Abb. 8/5). Nun wird sie unter Wasser waagerecht über die Probe geführt, passgenau über die Probe gestülpt und behutsam aufgedrückt (Abb. 8/6). Dies kann mit vormontierter poröser Platte erfolgen (Standardmethode) oder aber mit vorher entfernter poröser Platte (empfohlene Methode bei unkonsolidierten Substraten, z.B. losem gepackten Sand). Durch den Überstand der Porenscheibe erfolgt eine zentrische Führung. Es ist wichtig dass die Kontaktfläche zwischen Porenscheibe und Stechzylinder vor dem Aufsetzen frei von Bodenpartikeln ist, und dass die Zylinderaußenwand glatt und unverschmutzt ist.

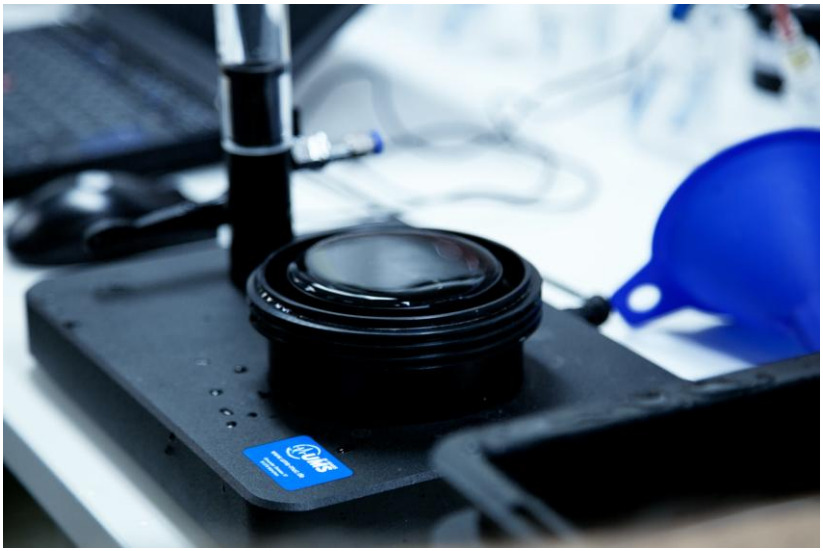


Abb. 7: Fluten der Grundplatte.

3.2 Montage der Probe

3.2.1 Vorbereiten des KSAT-Basisgeräts

Füllen Sie die Bürette und Öffnen Sie die Verbindung zwischen Bürette und Basisgerät, so dass der Innenraum des Gerätesockels mit Wasser geflutet wird. Lassen Sie so lange Wasser einlaufen, bis sich die Wasseroberfläche über dem Rand ausbreitet und in die Ablaufrinne strömt. Stoppen Sie nun den Zulauf. Sie sollten einen ca. 2 mm hohen, an der Kante gewölbten Überstau erkennen (Abb. 7).

3.2.2 Aufsetzen des Messgutes

Drehen Sie den Stechzylinder samt Adapter in der Wanne auf den Kopf, so dass der Stechzylinder nun auf dem Adapterring steht. Achten Sie darauf, dass das Drehen vollständig unter Wasser stattfindet.

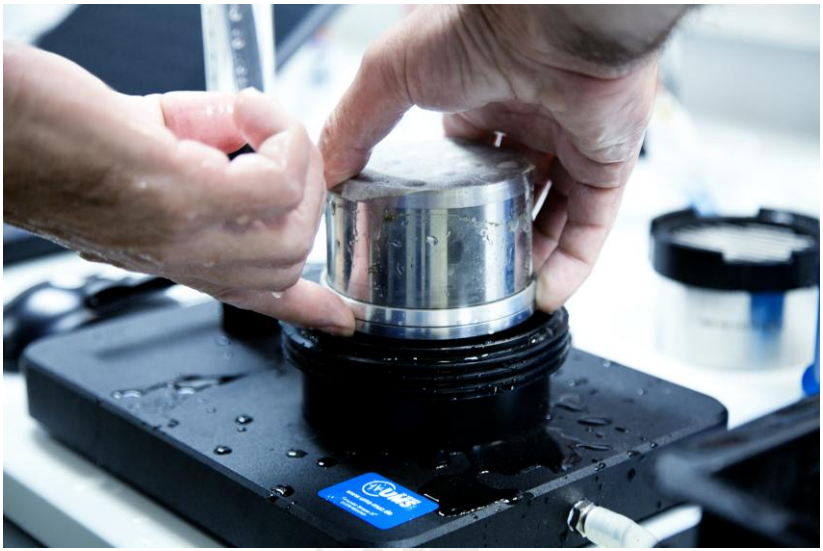


Abbildung 8: Aufsetzen des Stechzylinders mit Adapter.

Fluten Sie durch kurzes Öffnen des Bürettenhahns nochmals den Sockel, so dass gewährleistet ist, dass das Wasser leicht bauchig über dem Sockel steht. Entnehmen Sie den Adapterring samt Stechzylinder dem Wasserbad, bewegen Sie ihn in waagerechter Haltung zum Messgerät und setzen sie ihn wie in Abb. 8 gezeigt leicht schräg auf die freie Wasseroberfläche auf. Sofern Sie die Probe stets waagerecht halten, können Sie die aufgesättigte Probe + Platte außerhalb des Wassers transportieren und bewegen. Die Poren werden das Wasser gegen die Gravitation festhalten. Vermeiden Sie dagegen die Senkrechtstellung der Platte, da dann die Gravitationskräfte die Platte am oberen Ende bereits entwässern.

Wichtig! Setzen Sie den Ring mit Stechzylinder zunächst leicht schräg auf, und senken Sie in dann in die Waagerechte ab. Dies gewährleistet, dass sich die Kontaktfläche der porösen Platte und der Wasserfilm des Sockels sich ohne Lufteinschlüsse verbinden.

Prüfen Sie nach dem Aufsetzen durch waagerechtes Verschieben des Stechzylinders ob er perfekt zentriert im Sockel eingebracht ist. Er muss mit einem Spiel von ca. 0.5 mm einrasten.

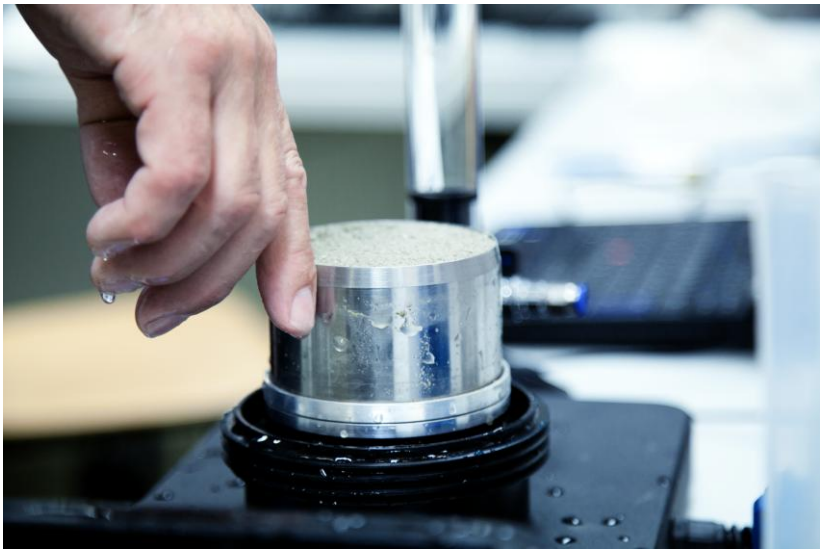


Abbildung 9: Säubern des Stechzylinders.

3.2.3 Aufsetzen des Oberen Adapterrings

Säubern Sie die Schräge der Schneide des Stechzylinders, und drücken Sie den oberen Adapterring in passender Orientierung (mit dem Dichtungsring nach unten) mit sanftem vertikalem Druck zentriert auf den Stechzylinder auf. Achten Sie darauf, dass keine Verkantung erfolgt.Der Adapterring wird leicht zurückfedern. Das System ist nun bereit, durch Aufsetzen der Schraubkappe endgültig fixiert zu werden.

Abbildung 10: Aufsetzen des oberen Adapterrings.

3.2.4 **Aufsetzen der Schraubkappe**

Stülpen Sie nun vorsichtig die Abschlusshaube über das System, und beginnen Sie, die Schraubkappe durch Rechtsdrehung unter leichtem vertikalem Anpressen festzuziehen (Abb. 11). Achten Sie darauf, Verkantungen zu vermeiden, das Festziehen muss leichtgängig erfolgen. Nach einigen Umdrehungen werden Sie bemerken, wie die Schraubkappe Kontakt mit der Innenseite des oberen Adapterrings bekommt und greift. Von da an ziehen Sie unter zunehmendem vertikalen Druck noch etwa eine halbe Umdrehung weiter an, um die Dichtung des Systems zu gewährleisten (Drehmoment ist ca. 1 Nm). Die Probe ist nun in der Messapparatur montiert.

Abbildung 11: Aufsetzen der Fixierungshaube.

3.2.5 Fluten des Messgutes bis zum einsetzenden Überlauf

Nach Fixierung des Messgutes öffnen Sie den Verbindungshahn zwischen Bürette und Messgut. Als Folge wird Wasser durch die Probe fließen, und es baut sich zunehmend ein Wasserfilm auf. Lassen Sie so lange Wasser durchfließen, bis der Überlauf erkennbar einsetzt.

Tipp Um den Aufbau des Wasserüberstandes zu beschleunigen, können sie bei sehr gering leitfähigen Proben Wasser von oben zugeben, bis der Überlauf einsetzt. Bitte achten Sie darauf, die Probenoberfläche dabei nicht zu erodieren.

Schließen Sie den Verbindungshahn wieder. Der angezeigte Druck in der KSAT View-Oberfläche sollte sich nun auf den Wert 0,00 cm zubewegen. Bei Proben mit hoher Durchlässigkeit erfolgt dies fast sofort, bei Proben mit extrem geringen Durchlässigkeiten kann dies Minuten dauern. Abweichungen des final angezeigten Wertes im Bereich bis 0.1 cm sind unproblematisch.

4 Durchführung einer Messkampagne

Eine Messkampagne beinhaltet die Konfiguration der Messung, die Messdatenerfassung und die Auswertung der Messdaten. Diese Informationen werden in einer Datei für eine spätere Weiterverwendung gespeichert.

Bevor Sie eine Messkampagne durchführen, sollten Sie sich zunächst mit den Funktionen von KSAT View® vertraut machen. Sie haben die Möglichkeit, ihrer ersten Messversuche mit künstlich erzeugten („synthetischen“) Daten zu machen (siehe Kapitel 4.x.x.).

Bei ausgeschaltetem oder im Ruhezustand befindlichen PV werden keine Messwerte gespeichert.

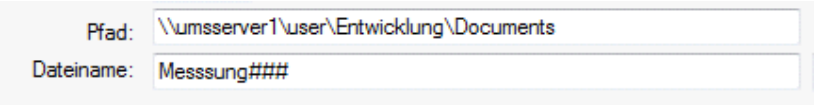
Entwurf

4.1 Startbedingungen für Hardware

1. Die Apparatur muss waagerecht, verrutschungssicher und erschütterungsfrei auf festem Untergrund aufgebaut sein.
2. Die gesamte Apparatur muss frei von Luftblasen sein.
3. Die Bodenprobe sollte vor Beginn der Messung völlig aufgesättigt sein.
4. Probenkörper und Perkolationsfluid müssen auf eine annähernd konstante Raumtemperatur equilibriert sein.
5. Die Perkolationslösung (in der Regel Leitungswasser) muss entlüftet sein. Rückdiffusion von Luft sollte beschränkt sein.

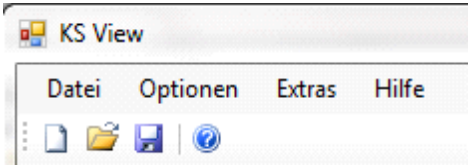
4.2 Konfiguration der Kampagne in KSAT View

Im Messkampagnenfenster müssen Dateiname, Startwert des Counters zur Dateinamenerweiterung, und Speicherort festgelegt werden. (siehe Abb. unten)



4.2.1 Systemeinstellungen

In Menuefenster „Optionen“ können Sie die allgemeinen Parametereinstellungen für die Geometrie der Proben, der Büretten und den Systemwiderstand eingeben (siehe Kapitel Querverweis).

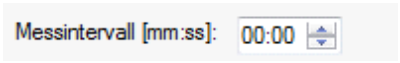


Alle Systemeinstellungen sind als Voreinstellungen auf das KSAT-System abgestimmt, wie es von UMS ausgeliefert wird (Probenhöhe 5 cm, Plattendicke 1 cm, Plattenleitfähigkeit 50000 cm/d, Bürettenquerschnitt 4,56 cm², Probenquerschnitt 50.0 cm²). Ändern Sie die Systemeinstellungen für die allgemeinen Parameter nur dann, wenn Sie ganz sicher sind, dass diese Änderungen tatsächlichen Änderungen der Systemparameter entspricht.

Die Manipulationsmöglichkeiten hängen von ihren Nutzerrechten ab. Als Voreinstellung sind Sie „Standard-User“, und können keine direkten Manipulationen der Systemparameter vornehmen.

4.2.2 Messeinstellungen

Bei den Messeinstellungen können Sie wählen, ob die Datenaufnahme nach einem automatischen Modus erfolgt oder mit konstanter Zeitpunkten. UMS empfiehlt die Verwendung des automatischen Modus. Dieser wird aktiviert, in dem Sie die Zeitdifferenz für zwei Messungen auf den Wert 00:00 stellen. Bevorzugen Sie den manuellen Modus, so geben sie die gewünschte Intervalllänge für zwei Messungen im entsprechenden Menü ein.



Im automatischen Modus werden Messwerte dann ausgeschrieben, wenn die Druckhöhenveränderung einen Betrag von mindestens ΔH_min über-

schritten hat. Dieser Parameter ist im Menü „Extras“ konfigurierbar. Es gilt $\Delta H_min \geq 0.1$ cm (= Defaultwert).

Eine weitere Messeinstellung ist der Wert der Druckhöhendifferenz H_min, bei dem die Messung automatisch stoppen soll. Die Voreinstellung für H_min ist 2.0 cm, der zulässige Mimimalwert ist 0.5 cm.

4.3 Durchführung der Messung

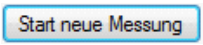
4.3.1 Befüllung der Bürette

Vor dem Start der Messung muss die Bürette durch Zufuhr von entlüftetem Wasser (bevorzugt über die Zulaufleitung aus dem erhöht stehenden Vorratsgefäß) befüllt worden sein, damit ein hydraulischer Gradient induziert wird. Eine Wasserspiegelanhebung in der Bürette um 5 cm führt an einer 5 cm hohen Bodenprobe zu einem initialen hydraulischen Gradienten von 1,0. Dies entspricht dem Gradienten, der unter natürlichen Verhältnissen durch die Gravitation erzeugt wird.

Aufgrund der hohen Genauigkeit des Druckaufnehmers werden auch kleinste Änderungen im Druck präzise registriert, und es besteht keine Notwendigkeit für sehr hohe Gradienten. Hohe Gradienten sind allein für sehr gering durchlässige Proben zur Verkürzung der Messzeit sinnvoll.

Hinweis! Wir empfehlen, zunächst mit einer Überstauhöhe von etwa 5,0 cm zu starten, da dies der in den DIN-Normen empfohlenen maximal schonenden Behandlung der Bodenprobe entspricht. Bei größeren Überstauhöhen kann es zum einen zu einer Hebung der gesamten Probe kommen, und die Wahrscheinlichkeit für erosionsbedingte Änderungen des Probekörpers wird verstärkt.

4.3.2 Start und Stop von Messungen

Die Messung wird durch Klicken auf den Button 

initiiert. Sie haben nun die Möglichkeit, im Konfigurationsmenü ihre gewünschten Einstellungen zur Messung vorzunehmen. Es werden daraufhin die Druckwerte im gewählten Modus und in der gewählten zeitlichen Auflösung registriert und angezeigt (die Anzeige sollte bei geschlossenem Zulauf

0,0 cm betragen). Öffnen Sie nun den Verbindungshahn zwischen Bürette und Probe. Es werden automatisch die in der Konfiguration angegebenen Parameter übernommen.

Nach Beginn der Messkampagne öffnen Sie den Verbindungshahn zwischen Bürette und Messgut. Die Software erkennt automatisch den Beginn des Druckabfalls und setzt diesen Zeitpunkt als Startpunkt für die Auswertung fest.

Die auflaufenden Daten werden visualisiert und ab dem Vorhandensein von mindestens zwei validen Messwerten in Echtzeit in die Berechnung von Ks umgesetzt. Die Messung im Falling-Head-Modus kann nun unbeaufsichtigt laufen. Sie wird automatisch beendet, wenn ein Stop-Kriterium erreicht wird (siehe Kap. 4.3.6). Die Messkampagne kann auch jederzeit manuell durch Drücken der Taste „Stop Messung“ beendet werden, und danach als neue Messung wieder aufgenommen werden. Bei einer Neu-Aufnahme wird die neue Messung in Form eines weiteren Reiters dem Fenster eingefügt. Die vorigen Messungen bleiben erhalten und sind auch während einer laufenden Messung anklickbar.

In der Regel ist es für eine verlässliche Messung nicht nötig, einen großen Zeitraum mit Daten aufzunehmen. Nach einem Abfall des Bürettenstandes von ca. 1,0 cm haben Sie meist eine stabile Schätzung der hydraulischen Leitfähigkeit, sofern diese im Messverlauf konstant bleibt. Ursachen für eine nicht-konstante Leitfähigkeit sind im Kapitel x.xx diskutiert.

Die nötige Messzeit liegt für Sand im Bereich von wenigen Sekunden, für Schluffe und Lehme im Bereich von Sekunden bis Minuten, und für dichte, unstrukturierte Tone im Bereich von Stunden.

Da die Wasserstände über Drucksensoren gemessen werden, ist es nach Start der Messkampagne wichtig, dass keine Erschütterungen oder Vibrationen auf das Messsystem übertragen werden, die das Wasser in Schwingung versetzen können. Beispiele sind schlagende Türen, Schwingungen des Fußbodens durch Personen, Schwingungen des Messtisches durch Arbeiten am selben Tisch. Grundsätzlich gelten dieselben Kriterien wie für das Aufstellen und Betreiben von Waagen.Temperatur und

4.3.3 Aktuelle Informationen (Status)

Oben rechts im Systemfenster wird stets die aktuelle Temperatur und Druckhöhendifferenz angezeigt, egal ob eine Messkampagne läuft oder nicht.

Aktuelle Informationen werden in einem Textfenster und einer Grafik dargestellt. Das Grafik-Fenster visualisiert den zeitlichen Verlauf der Messdaten sowie den Verlauf der angepassten Exponentialfunktion. Das Fenster wird mit jedem neuen Messwert aktualisiert.

Das Textfenster beinhaltet die Grundmeldung, ob eine Messung läuft (laufender grüner Balken) oder abgeschlossen ist. Angezeigt werden weiter der Zeitpunkt des Starts der Messung und die aktuelle Versuchsdauer. Nach Erfassung des zweiten Messwertes wird ferner die voraussichtliche Zeit bis zum Erreichen der Druckhöhendifferenz angezeigt, bei der die Messung beendet ist. Es folgen die Eingabedaten Probenbezeichnung und Lagerung, sowie die geometrischen Systemparameter.

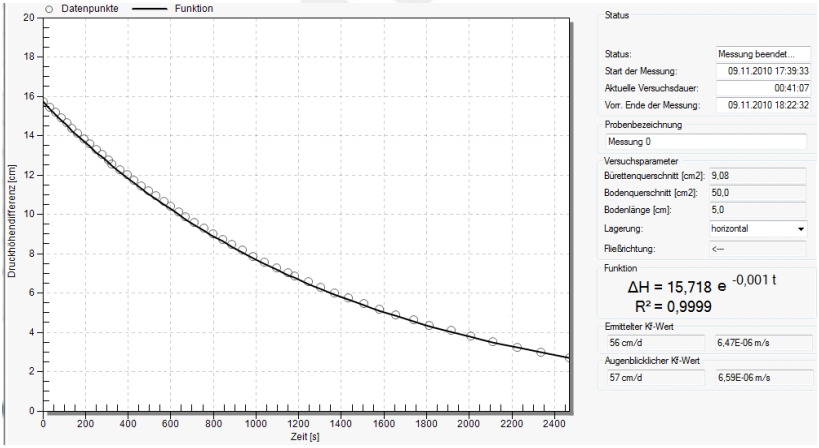


Abbildung 12: Grafik der KSAT View-Oberfläche mit laufenden Informationen einer Messkampagne. Vermessen wurde ein schluffiger Lehm aus Scheyern.

Die Auswertungsergebnisse der Messung werden in Form der ermittelten Fließrichtung, der an die Messdaten angepassten Exponentialfunktion und

des Korrelationskoeffizienten der Anpassung, sowie der ermittelten Leitfähigkeiten (in cm/d und m/s) ausgegeben. Diese Auswertungsergebnisse werden mit jeder neuen Messung aktualisiert.

4.3.4 Löschen bisher aufgenommener Daten

Sofern die ersten Daten einen unerwarteten Verlauf anzeigen, wie es durch Schwingungen oder andere Störungen vorkommen kann, können diese Messungen im Anzeigefenster von KSAT View durch Anklicken des Buttons <Daten löschen> aus der Messung entfernt werden. Die Messung selbst läuft mit den neu auflaufenden Daten weiter. Das Löschen kann beliebig oft wiederholt werden.

4.3.5 Ende einer Messkampagne

Eine Messung endet automatrisch, wenn die Druckhöhendifferenz ein Stoppkriteium erreicht. Stoppkriterien sind (1) das Überschreiten einer relativen Abfallhöhe (Voreinstellung: ¾ der ursprünglichen Überstauhöhe), (2) das Unterschreiten einer minimalen Überstauhöhe (Voreinstellung 1 cm). Die voreingestellten Werte können durch Power-User im Menü „Optionen“ verändert werden.

Die Messung kann jedoch auch lange vorher schon manuell beendet werden, wenn der Bearbeiter sieht, dass der zu ermittelnde Wert mit hoher Genauigkeit und Verlässlichkeit erhoben ist. Dies ist für mittel bis gut leitende Proben bereits nach wenigen Sekunden er Fall.

4.4 Ausbauen der Stechzylinderprobe

1. Schließen Sie den Verbindungshahn zur Bürette
2. Lösen Sie die die Anpressung des Stechzylinders durch Linksdrehen der Schraubkappe. Nehmen Sie die Schraubkappe vorsichtig vertikal nach oben ab.
3. Halten Sie den nun freigelegten Stechzylinder mit einer Hand, und ziehen Sie vorsichtig den oberen Adapterring mit dem Sieb nach oben ab.

4. Heben Sie nun Stechzylinder samt unterem Adapterring von der Apparatur ab. Beachten Sie dabei, dass nach Entfernung der Überwurfhaube der Stechzylinder unfixiert auf der Basis steht.

5. Der Stechzylinder kann nun entweder zur weiteren Verwahrung verschlossen werden, oder unmittelbar für die Messung der ungesättigten hydraulischen Eigenschaften mit HYPROP-EVA© verwendet werden. In beiden Fällen ist der Stechzylinder mit einer Abdeckung oder einem Deckel auf der Oberseite zu versehen. Er wird dann vertikal gedreht, und der untere Adapterring wird abgenommen, in dem zunächst die Fixierhülse gegen den Stechzylinder abgezogen wird, und dann der Adapterring abgehoben wird.

Bei der Abnahme der porösen Scheibe vom Stechzylinder bleiben je nach Bodenrt Partikel an der porösen Scheibe kleben. Diese können mit Hilfe einer Spritzflasche vorsichtig abgespült oder mit einer Minispachtel abgezogen und der Probe wieder zugeführt werden.

4.5 Auswertung der Messdaten

Die Auswertung der Messdaten wird während der Messung in Echtzeit vorgenommen. Es sind keine weiteren Auswertungsschritte notwendig.

Die Ausgabe der Ergebnisse erfolgt als Messwert bei der vorliegenden Umgebungstemperatur, sowie als Wert bei einer gewählten Referenztemperatur. Die Umrechnung erfolgt nach DIN 18130. Der Sensor hat bei 10 °C eine Toleranz von $\pm$0,2 K.

4.6 Exportieren von Messdaten und Ergebnissen

Die aufgenommenen Messdaten, Diagramme und Messergebnisse werden nach Beendigung einer Messkampagne automatisch gespeichert und auf dem zu Beginn der Kampagne festgelegten Dateienverzeichnis abgelegt. Als Dateiname werden der jeweilige Probename und dessen Erweiterung durch den Counter verwendet.

Messwerte werden im .csv-Format gespeichert, so dass diese in Programmen wie z.B. Excel eingelesen werden können. Diagramme können als Bild im .jpg-Format exportiert werden.

4.7 Typische Ergebnisse

4.7.1 Beispiel Sand, Falling Head Modus

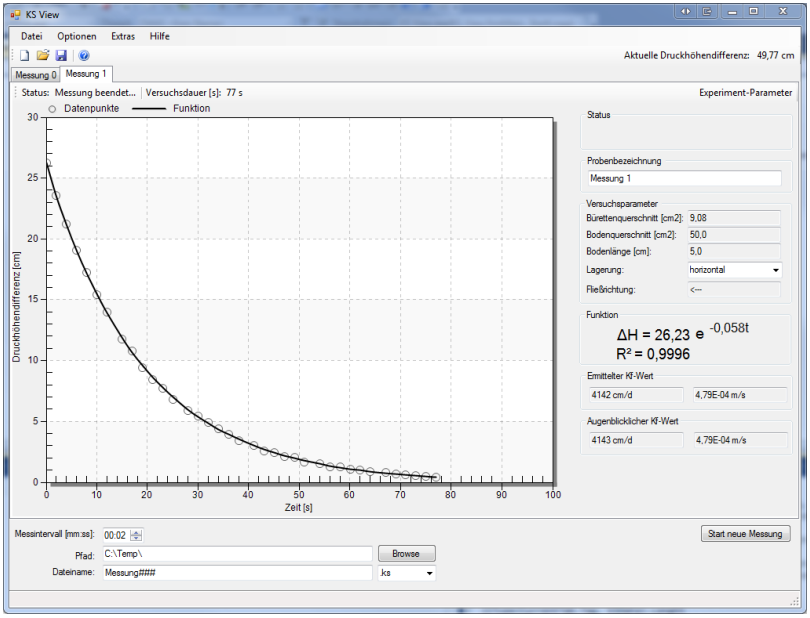


Abbildung 13: Typischer Verlauf i mFalling-Head-Modus.

4.7.2 Wertebereiche für k_f

Sofern nichts anderes angegeben ist, beziehen sich die in der Literatur angegebenen Werte für k_f üblicherweise auf *Wasser*. Ist der Durchlässigkeitsbeiwert k_f für ein mit Wasser durchströmtes Medium bekannt, dann lässt sich die Durchlässigkeit dieses Mediums für andere Stoffe berechnen (siehe "Bestimmung der Permeabilität").

Wasserdurchlässigkeit nach DIN 18130:

- sehr stark durchlässig >10^{-2} m/s
- stark durchlässig 10^{-2} bis 10^{-4} m/s
- durchlässig 10^{-4} bis 10^{-6} m/s
- schwach durchlässig 10^{-6} bis 10^{-8} m/s
- sehr schwach durchlässig < 10^{-8} m/s

Durchlässigkeitsbeiwerte für Lockergesteine (Wasser):

- reiner Kies: 10^{-1} bis 10^{-2} m/s
- grobkörniger Sand: um 10^{-3} m/s
- mittelkörniger Sand: 10^{-3} bis 10^{-4} m/s
- feinkörniger Sand: 10^{-4} bis 10^{-5} m/s
- schluffiger Sand: 10^{-5} bis 10^{-7} m/s
- toniger Schluff: 10^{-6} bis 10^{-9} m/s
- Ton: < 10^{-9} m/s

Die Grenze zwischen einem durchlässigen und einem undurchlässigen Boden liegt etwa bei 10^{-6} m/s. Böden mit einem k_f-Wert < 10^{-9} m/s sind nahezu völlig wasserundurchlässig.

Entwurf

5 Wartung und Pflege

Der Differenzdruckaufnahmer ist werksseitig kalibriert. Die Kennliniensteigung ist linear und verändert sich normalerweise nicht. Sofern Sie die Steigungskalibrierung prüfen wollen, können Sie mit Hilfe der mitgelieferten Stahlplatte, welche Sie unter einen leeren Stechzylinder montieren, den Auslass des Gerätesockels abdichten und mit Hilfe der Bürettengradierung verschiedene Wasserstände einstellen. Die eingestellten Wasserstandsdifferenzen müssen Druckaufnehmer entsprechend angezeigt werden. Wir empfehlen eine Zweipunktprüfung mit Null und 20 cm Wassersäule.

Sollten sie Abweichungen in der Steigung feststellen, kontaktieren Sie bitte UMS.

Lagerung

Wird das KSAT-System längere Zeit nicht verwendet, sollten die Büretten und Infiltrationshauben zur Vermeidung von Algenbildung entleert und trocken gelagert werden.

Reinigung

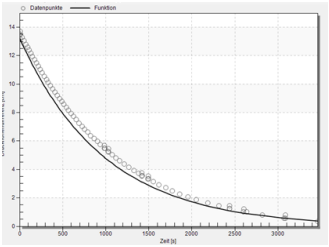
Das Äußere des KSAT-Gerätes kann mit einem feuchten Lappen abgewischt werden. Vermeiden Sie das Eintrocknen von Wasserlachen. Der Innenraum des KSAT-Gerätes sollte durch Regelbetrieb wenig verschmutzt werden, da die Porenplatte einen Filter zum Messgut bildet und die Durchströmung aus dem KSAT-Gerät heraus erfolgt. Haben sich doch Erd- und Sandkörner abgesetzt, so sollte am Ende einer Messkampagne das gesamte KSAT-Gerät unter einem weichen Wasserstrahl gereinigt werden. Achten Sie dabei darauf, den Druckaufnehmer niemals hohem Druck oder der Berührung mit einem festen oder spitzen Gegenstand auszusetzen. Sie können die Reinigung mit Wasser durch einen Reinigungspinsel unterstützen.

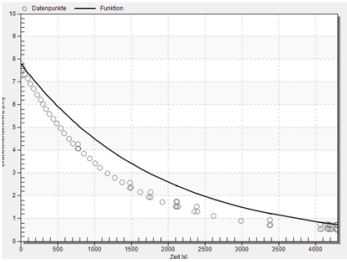
Die Ablaufrinne und die Leitung zum Ablaufschlauch können Sediment enthalten, insbesondere wenn Proben durch den Messvorgang erodiert wurden (dies sollte i.d. Regel durch Wahl einer kleinen Überstauhöhe und eines geeigneten Abschlusses oben (Porenplatte) verhindert werden). In dem Fall empfiehlt sich das Freispülen durch einen großen Wasserdurchsatz, der z.B. aus einem Gefäß direkt auf die Rinne aufgegeben werden kann.

Erd- und Sandablagerungen im Bereich des Gewindes der Krone können das Aufschrauben der Krone zu einer knirschigen Angelegenheit werden lassen und die Materialoberflächen aufrauhen. Dies sollte vermieden werden. Bei Verschmutzung des Gewindes wird angeraten, diese mit einer Spritzflasche oder dem fließenden Wasser abzuwaschen, oder im trockenen Fall mit Hilfe einer Bürste sowohl vom Innen- (Krone) wie vom Außengewinde (Sockel) zu entfernen.

Entwurf

6 Fehlersuche

Problem	Ursache/Behebung
PC erkennt das Gerät nicht	(1) Prüfen Sie im Geräte Manager, ob KSAT USB Treiber korrekt installiert wurde und installieren Sie den KSAT USB Treiber gegebenenfalls erneut. (2) Starten Sie die KSAT View Software erneut.
Misfit Typ 1 	(3) Probe leckt; kontinuierlicher Wasserverlust. / Prüfen Sie die Messzelle auf Wasseraustritt, und Stellen Sie die Dichtigkeit der Probeneinfassung sicher, ggf. durch Lösen der Verspannung, Entnahme des Dichtringes, Säubern des Randes und des Dichtringes, und erneutem Verspannen. / Stellen Sie im Fall von Langzeitmessungen sicher, dass die Bürette nicht gegen die Atmosphäre geöffnet sind. (4) Probe ändert ihre Leitfähigkeit im Lauf des Messvorgangs. a) Probe wird durch den Messvorgang innerlich erodiert – LF steigt im Lauf der Messung. /Arbeiten Sie einen möglichst geringen hydraulischen Gradienten. b) Lösung von Gasbläschen erzeugen geringer werdenden Über-

	gangswiderstand am Übergang Boden-Platte bzw. Erhöhung der Leitfähigkeit der Bodenprobe. /Wiederholen Sie die Messung bis Konstanz erreicht wird. c) Temperaturschwankung: die Viskosität der Messflüssigkeit verringert sich durch Erwärmung. / führen Sie die Messung unter konstanten Temperaturbedingungen durch. d) Extrem hohe Fließraten führen zu turbulentem Fluss in der Anfangsphase. /Arbeiten Sie einen möglichst geringen hydraulischen Gradienten.
Misfit Typ 2  	Probe verringert ihre Leitfähigkeit im Lauf des Messvorgangs. Ursachen können sein: a) Verwendetes Fluid ändert die Leitfähigkeit der Probe, z.B. wenn die Ionenstärke und die Ionenzusammensetzung nicht der der Bodenlösung entspricht. /Verwenden Sie eine Lösung mit einer höheren Elektrolytkonzentration mit einem zweiwertigen Kation (z.B. 0.05 m $CaCl_2$) als Perkolationsfluid b) Temperaturschwankung: die Viskosität der Messflüssigkeit vergrößert sich während der

	Messung durch Abkühlung. / führen Sie die Messung unter konstanten Temperaturbedingungen durch. e) Ausgasung von gelösten Gasen aus der Wasserphase erzeugen Blasenfilm am Übergang Boden-Platte. /Führen Sie die Messung nicht bei zunehmenden Umgebungstemperaturen durch / Verwenden Sie entgastes Wasser c) CO2-Produktion durch Bodenlebenwesen erzeugen Blasenfilm am Übergang Boden-Platte/ Verwenden Sie ein Biozid in der Perkolationslösung

7 Theoretische Grundlagen

7.1 Allgemeines

Die Wasserspeicherung und Wasserleitung in Böden ist von herausragender Bedeutung für eine Vielzahl von ökosystemaren Prozessen in terrestrischen Ökosystemen. Die gesättigte Wasserleitfähigkeit beeinflusst Faktoren wie die landwirtschaftlichen Nutzungsmöglichkeiten, geotechnische Eigenschaften und ist eine Schlüsselgröße beim Transport von Nähr- und Schadstoffen. Sie ist die bestimmende Größe für das Design von Drainagen oder den Betrieb von Beregnungsanlagen.

7.2 Messprinzip

Man lässt eine voll mit Wasser gesättigte Stechzylinderprobe senkrecht zum Probenquerschnitt in einer Apparatur stationär oder in stationär mit entlüftetem Wasser bei Raumtemperatur durchströmen und misst den Wasserdurchsatz Q = V/t. Die Wasserdurchlässigkeit (K_f bzw. K_s-Wert) errechnet sich aus dem perkolierten Wasservolumen V in der Zeit t, dem Fließquerschnitt A, der Höhe hydraulischen Druckhöhendifferenz H und der Länge der Bodensäule L, über welche die Druckhöhendifferenz abgebaut wird. Nach Darcy (1857) gilt für die Flussdichte q bei laminaren Fluss

$$q = \frac{V}{A \cdot t} = -K_s \frac{H}{L} \text{ und somit } K_s = \frac{L\Delta V}{HAt}.$$

7.3 Constant Head-Messung

Die Messanlage (Abb. 15) besteht aus einem Säulenfuß mit Wasserzulauf, einer Bodensäule, und einem Wasserüberlauf. Die Durchströmungsrichtung ist vertikal von unten nach oben. Die Bodensäule wird in aufgesättigtem Zustand wasserdicht auf dem Säulenfuß fixiert. In den Säulenfuß mündet der Auslauf einer Mariotte'schen Flasche. Die Veränderung im Vorrat in der Mariotte'schen Flasche erlaubt die volumetrische Messung des kumulativen Zuflusses [cm³]. Nach Öffnen der Verbindung zwischen Mariotte'scher Flasche und Säulenfuß beginnt die Perkolation. Wenn die Zufluss-

rate konstant und gleich der Ausflussrate ist, dann ist die Messung stationär. Ab diesem Zeitpunkt sind die Voraussetzungen für eine Messung nach der „constant head“-Methode gegeben. Es erfolgt die Messung der effektiven Leitfähigkeit des Gesamtsystems, die durch den Widerstand des Bodens, der porösen Platte, und der Leitungen bestimmt ist. Sofern die untere Platte grobporig gewählt wird, besitzt sie eine Leitfähigkeit, die in der Regel weit über der des Bodens liegt. Ihr Widerstand im Fließsystem ist somit vernachlässigbar. Die Messung beginnt, wenn stationäre Fließbedingungen vorliegen. Sie ist beendet, sobald die Messdatenstreuung gering genug ist um ein eindeutiges Ergebnis zu gewährleisten.

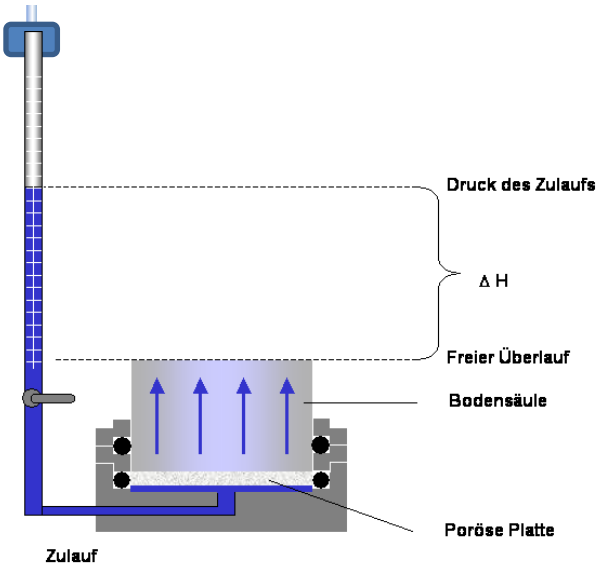


Abb. 14: Schematischer Aufbau der k_s -Messung „constant head.

Aufgenommen werden die tabellierten Daten

Zeit	Kumulative Perkolation [g]
. . .	. . .
. . .	. . .

sowie die Parameter Länge L und Durchmesser D der Bodensäule, ggf. die Höhe der Platte Δz_{Platte} und die Wasserstandsdifferenz zwischen Zulauf und Ablauf ΔH.

Zur Auswertung der Constant-Head-Messung erfolgt zunächst die Ermittlung der stationären Durchflussrate Q über lineare Regression der Auslaufdaten. Die Berechnung der hydraulischen Leitfähigkeit k_s (cm d^{-1}) bei konstantem Überstau erfolgt nach

$$k_s = \frac{Q}{A_{Bodensäule}} \cdot \frac{\Delta L}{\Delta H} \qquad \text{(xx)}$$

mit	Q	[cm³ d^{-1}]	stationäre Strömungsrate aus Mariotte'schen Flasche
	$A_{Bodensäule}$	[cm²]	durchströmte Fläche der Bodensäule
	ΔL	[cm]	Länge der Bodensäule
	ΔH	[cm]	antreibende hydraulische Druckhöhendifferenz

7.4 Falling Head-Messung

Bei Versuchen an wenig durchlässigen Proben benötigt die Methode mit konstantem Überstau erheblich Zeit. Eine Verkürzung der Versuchszeit wird erreicht durch (a) Erhöhung des hydraulischen Potentialgradienten und (b) eine Erhöhung der Ablesegenauigkeit für die volumetrische Zuflussrate. Beides wird realisiert bei der Methode mit fallendem Überstau. Die Messanlage ist im Grundsatz analog zur Messung mit konstantem Überstau aufgebaut (Abb. 16). Primärer Unterschied ist, dass die Mariotte'sche Flasche im Zulauf durch eine Bürette mit frei fallendem

Entwurf

Wasserspiegel ersetzt wird. Die Messung beginnt mit dem Öffnen des Verbindungshahns zwischen Bürette und Bodensäule. Das Wasser strömt nun zunächst mit hohem Druck und einer entsprechend hohen Rate, dann mit einer zunehmend kleiner werdenden Rate durch die Bodensäule aus.

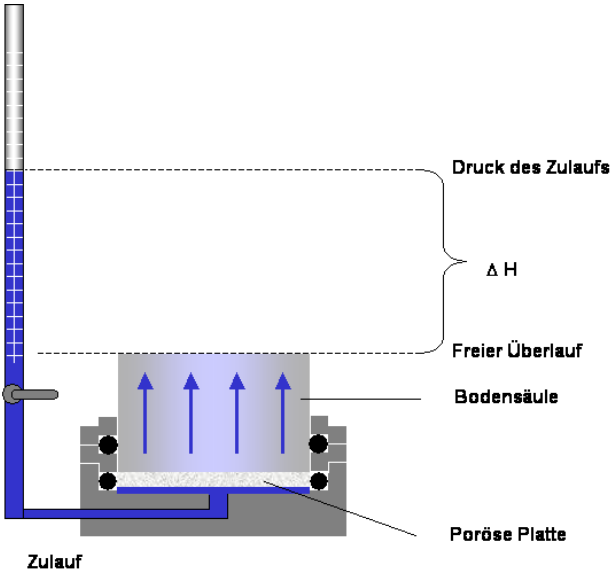


Abb. 15: Schematischer Aufbau der ks -Messung „falling head.

Aufzunehmende Daten sind:

Länge L und Fläche A_{Boden}:der Bodensäule.

- Bürettenquerschnitt $A_{Bürette}$
- Eine Tabelle mit folgenden Daten:

Zeit	Überstauhöhe ΔH [cm]
. . .	. . .
. . .	. . .

Bei fehlerlosem Versuchsverlauf erfolgt ein exponentieller Abfall der Druckhöhendifferenz gegen die Zeit (Abb. 17).

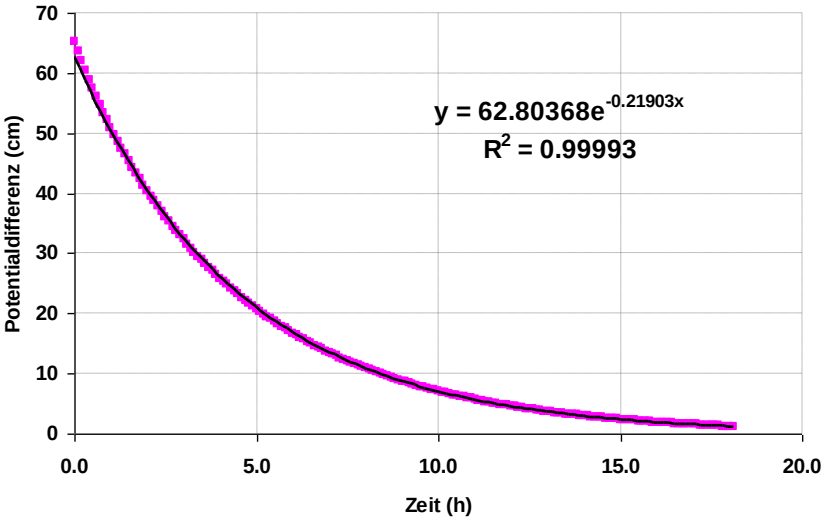


Abb. 16: Abfall der Potentialdifferenz beim Versuch „Falling Head". Beispielmessung erfolgte für eine gepackte Probe eines Quarzschluffs „milisil M6".

Aus den Versuchsparameten Länge der Bodensäule *L,* Querschnitt der Bodensäule A_{Boden}, sowie dem Bürettenquerschnitt $A_{Bürette}$ sowie den aufgenommene Daten der Wasserspiegelhöhe (relativ gegen die Höhe des Auslaufes) errechnet sich die hydraulischen Leitfähigkeit Ks nach zwei Methoden.

7.4.1 Errechnung aus zwei einzelnen Messwertpaaren H(t)

$$k_s = \frac{A_{Bürette}}{A_{Boden}} \cdot \frac{L}{\Delta t_{i \to i+1}} \cdot \ln\left(\frac{H_{t_i}}{H_{t_{i+1}}}\right) \qquad (1)$$

mit	$A_{Bürette}$	[cm²]	durchströmte Fläche der Bürette
	A_{Boden}	[cm²]	durchströmte Fläche der Bodensäule
	L	[cm]	Länge der Bodensäule
	$\Delta t_{i \to i+1}$	[d]	Differenz zweier Ablesezeiten t_i und t_{i-1}
	H_{t_i}	[cm]	hydraulische Potentialdifferenz zum Zeitpunkt t_i
	$H_{t_{i+1}}$	[cm]	hydraulische Potentialdifferenz zum Zeitpunkt t_{i+1}

7.4.2 Anpassung einer Modellkurve an den Experimentalverlauf

Die flächennormierte momentane Durchflussrate durch die Bodenprobe ergibt sich aus der Veränderung des Wasserstandes in der Bürette nach

$$q = \frac{Q}{A_{Boden}} = \frac{A_{Bürette}}{A_{Boden}} \cdot \frac{d\Delta H}{dt} \qquad (2)$$

Nach dem Darcy-Gesetz ist diese Rate gleich

$$q = -k_s \cdot \frac{H}{L} \qquad (3)$$

Gleichsetzen von (24) und (25) und Trennen der Variablen ergibt

$$\frac{1}{H}\, dH = -k_s \cdot \frac{A_{Boden}}{A_{Bürette}} \cdot \frac{1}{L}\, dt \qquad (4)$$

Durch Integrieren vom Anfangszustand $H = H_0$ zum Zeitpunkt $t = 0$ bis zu einem Zeitpunkt t erhalten wir

$$\ln H(t) - \ln H_0 = -k_s \cdot \frac{A_{Boden}}{A_{Bürette}} \cdot \frac{1}{L} \cdot t \qquad (5)$$

und somit

$$H(t) = H_0 \exp\left(-k_s \cdot \frac{A_{Boden}}{A_{Bürette}} \cdot \frac{1}{L} \cdot t \right) = a \exp\left(b \cdot t \right) \qquad (6)$$

Wird über eine Regression eine Exponentialfunktion an die beobachtete Zeitreihe $H(t)$ angepasst und so der Koeffizient *b* ermittelt, so ergibt sich daraus die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit nach

$$k_s = \frac{A_{Bürette}}{A_{Boden}} \cdot L \cdot b \qquad (7)$$

KSAT View nutzt zur Berechnung diese Methode.

7.5 Berücksichtigung des Apparaturwiderstandes

Ist die Leitfähigkeit des Bodens sehr hoch, muss der Widerstand des Messsystems, insbesondere der porösen Platten explizit berücksichtigt werden. UMS hat diesen Systemwiderstand $1/K_{Sys}$ vor Auslieferung der Apparatur gemessen und den Wert als Voreinstellung in der Parameterliste eingetragen. Die Leitfähigkeit des Bodens wird dann aus der effektiven Leitfähigkeit des Systems Platte-Boden k_{eff}, welche sich aus der Messauswertung (Gl. (7)) ergibt, folgendermaßen errechnet (DIN 19683-9, 1998):

Da sich die Widerstände ($R = L/k$) der beiden Systeme addieren, gilt

$$\frac{L_{Boden} + L_{Sys}}{k_{eff}} = \frac{L_{Boden}}{k_s} + \frac{L_{Sys}}{k_{Sys}} \qquad (8)$$

Durch Umformung und Auflösen nach k_s folgt

Entwurf

$$k_s = \frac{L_{Boden}}{\frac{L_{Boden} + L_{Sys}}{k_{eff}} - \frac{L_{Sys}}{k_{Sys}}} \qquad (9)$$

mit	L_{Boden}	[cm]	Länge der Bodenprobe
	L_{Sys}	[cm]	Dicke des Systemwiderstandes
	k_{Sys}	[cm d^{-1}]	gesättigte Leitfähigkeit der Systems[4]
	k_s	[cm d^{-1}]	gesättigte Leitfähigkeit der Bodenprobe

Der Effekt des Plattenwiderstandes wird in KSAT View berücksichtigt, auch wenn er in der Standardausführung von UMS HYPROP-KSAT nur bei extrem durchlässigen Proben bemerkbar wird[4].

7.6 Einfluss der Temperatur auf Ks

Die hydraulische Leitfähigkeit ist stark temperaturabhängig. Der Benutzer muss entscheiden, für welche Temperatur er die Messwerte angeben will, und ob eine Umrechnung von der Temperatur der Messung auf Standardbedingungen (25°C) oder eine ggf. andere Temperatur der Anwendung erforderlich ist. Die Umrechnung erfolgt proportional zur Viskosität von Wasser. Diese kann über die Funktion y = 0.0007 T² - 0.0531T + 1.764 approximiert werden (r² = 0.9996). Tabelle 1 listet einige Kennwerte der Viskosität.

Tabelle 1: Abhängigkeit der dynamischen Viskosität von Wasser von der Temperatur

Temperatur in °C	5	10	15	20	25

[4] In der KSAT View-Software wird für das System mit einer Plattendicke von 1 cm und eine Systemleitfähigkeit von 10000 cm/d in die Berechnung aufgenommen. Bei Verwendung von zusätzlichen Filtern oder Fliesen kann sich der Systemwiderstand erhöhen, und sollte vom Benutzer in Form einer Leermessung explizit ermittelt werden. Der Wert für K_{Sys} muss dann in der Parameterliste angepasst werden.

Dynamische Viskosität von reinem Wasser [mPa s], bei 1 bar	1,518	1,306	1,137	1,001	0,894

Nach DIN 18130-1 errechnet sich die Leitfähigkeit bei 10°C aus der bei T gemessenen Leitfähigkeit nach der Gleichung (10):

$$K_s(10°C) = \frac{1{,}359}{1 + 0{,}0337 \cdot T + 0{,}00022 \cdot T^2} \cdot K_s(T) \quad (10)$$

Dabei bezeichnet T in °C die Wassertemperatur beim Versuch, und $K_s(T)$ den ermittelten Durchlässigkeitsbeiwert bei der Temperatur T.

In KSAT View wird auf dieser Basis eine Viskositätskorrektur von der Messtemperatur T auf eine im Parameterfile definierte Referenztemperatur T_{ref} durchgeführt.

Entwurf

8 Literaturverzeichnis

- Dane J.H. und Topp G.C. (2002): Methods of Soil Analysis, Part 4, Physical Methods, Soil Science Society of America Book Series No. 5, ISBN 0-89118-810-X, Soil Science Society of America: Madison, p. 1692.
- Darcy, Henry (1856). Les fontaines publiques de la ville de Dijon. Dalmont, Paris.
- DIN 19683-9 (1998): Physikalische Laboruntersuchungen, Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit in wassergesättigten Stechzylinderproben. Beuth Verlag GmbH.
- DIN 18130 (1998): DIN 18130-1:1998-05 Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche. Beuth Verlag GmbH.
- Dirksen C. (1999): Soil Physics Measurements. Catena Verlag, Reiskirchen.
- Hartge K.-H. und R. Horn (2009): Die physikalische Untersuchung von Böden. 4. Auflage. E. Schweizerbartsche Verlagsbuchhandlung, Stuttgart.
- McKenzie N.J., T.W. Green und D.W. Jacquier (2009): Laboratory measurement of hydraulic conductivity. In: McKenzie et al.: Soil Physical Measurement and Interpretation for Land Evaluation. CSIRO Publ., Collingwood, Australien.

9 Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Schematische Darstellung der UMS-KSAT-Apparatur. 9
Abb. 2: Grundplatte 13
Abb. 3: Porenscheibe mit Porenplatte..... 15
Abb. 4: Obere Siebkrone mit Gitter 16
Abb. 5: KSAT View-Benutzeroberfläche..... 18
Abb. 6: Aufsättigung der Proben. 26
Abb. 7: Fluten der Grundplatte..... 29
Abbildung 8: Aufsetzen des Stechzylinders mit Adapter. 30
Abbildung 7: Säubern des Stechzylinders. 31
Abbildung 10: Aufsetzen des oberen Adapterrings. 32
Abbildung 11: Aufsetzen der Fixierungshaube. 33
Abbildung 11: Grafik der KSAT View-Oberfläche. 38
Abbildung 13: Typischer Verlauf i mFalling-Head-Modus. 41
Abb. 14: Schematischer Aufbau der k_s -Messung „constant head. 49
Abb. 15: Schematischer Aufbau der ks -Messung „falling head. 51
Abb. 11: Abfall der Potentialdifferenz beim Versuch „Falling Head“.. 52

Entwurf